

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.001; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.001.

仲复捷, 王毓森, 王东, 等. 洮河流域水沙演变特征及归因分析[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 46-53.

Zhong Fujie, Wang Yusen, Wang Dong, et al. Evolution characteristics and attribution analysis of runoff and sediment in Taohe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1): 46-53.

洮河流域水沙演变特征及归因分析

仲复捷, 王毓森, 王东, 曹杰

(甘肃省临洮水文水资源勘测中心, 甘肃 临洮 730500)

摘要: [目的] 分析水沙变化趋势和原因, 探究水沙变化之间的关系曲线, 为科学认识水沙变化机制, 促进黄河流域高质量发展提供支撑。[方法] 基于 1956—2023 年月尺度径流量、输沙量等数据资料, 采用 M-K 检验、Budyko 方程和累积量斜率变化率比较法分析了年输沙量、年径流量变化趋势, 诊断突变年份, 构建水沙关系曲线, 量化水沙变化原因。[结果] (1) 1956—2023 年洮河流域年径流量、年输沙量均呈显著下降趋势。其中, 红旗水文站年径流量和年输沙量下降速率最大, 分别为 -0.248 亿 m^3/a 和 -46.68 万 t/a 。岷县水文站年径流量和年输沙量下降速率最小, 分别为 -0.191 亿 m^3/a 和 -3.38 万 t/a 。(2) 1956—2023 年洮河流域各水文站年径流量和年输沙量均发生了突变。其中, 红旗水文站年径流量和年输沙量的突变时间分别为 1987 年、2003 年。(3) 1956—2023 年洮河流域各水文站的水沙关系曲线均呈幂函数。(4) 气候变化和人类活动对洮河流域径流减少的贡献率分别为 42.54% 和 57.47%, 对洮河流域输沙量减少的贡献率分别为 8.53% 和 91.47%。[结论] 洮河流域径流量、输沙量均呈显著减少趋势, 人类活动对其的影响超过了 50%, 人类活动是洮河流域减水、减沙的主要影响因子。

关键词: 径流; 输沙量; Budyko 方程; 累积量斜率变化率比较法; 洮河流域

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0046-08

Evolution characteristics and attribution analysis of runoff and sediment in Taohe River Basin

Zhong Fujie, Wang Yusen, Wang Dong, Cao Jie

(Lintao Hydrological and Water Resources Survey Center of Gansu Province, Lintao, Gansu 730500, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the trends and causes of runoff and sediment changes and to explore the relationship curves between runoff and sediment changes, thereby providing support for understanding the mechanisms of runoff and sediment changes and promoting the high-quality development in the Yellow River Basin. [Methods] Based on the data of monthly runoff and sediment discharge from 1956 to 2023, the M-K test, Budyko equation, and cumulative slope change rate comparison method were used to analyze the trends of annual sediment discharge and annual runoff, identify abrupt change years, construct the runoff-sediment relationship curves, and quantify the causes of runoff and sediment changes. [Results] (1) The annual runoff and sediment discharge from 1956 to 2023 in the Taohe River Basin showed a significant declining trend. Among them, the Hongqi hydrological station had the largest decline rate of the annual runoff and sediment discharge, which were $-2.48 \times 10^7 m^3/a$ and $-4.668 \times 10^5 t/a$, respectively. The Minxian hydrological station had the smallest decline rates of annual runoff and sediment discharge, which were $-1.91 \times 10^7 m^3/a$ and $-3.38 \times 10^4 t/a$, respectively. (2) The annual runoff and sediment discharge of each hydrological station underwent abrupt changes in the Taohe River Basin from 1956 to 2023. Among them, the abrupt change years of annual runoff and sediment discharge at

收稿日期: 2025-04-10

修回日期: 2025-04-22

接受日期: 2025-05-05

资助项目: 甘肃省水利科学试验研究及技术推广项目“洮河上游受水利工程影响前后水文情势研究”(24GSLK039)

第一作者: 仲复捷(1975—), 男, 甘肃临洮人, 高级工程师, 主要从事水文水资源评价和研究工作。E-mail: gslzjf@126.com

通信作者: 王毓森(1981—), 男, 甘肃武威人, 正高级工程师, 主要从事水文水资源勘测研究评价。E-mail: 1052593068@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

Hongqi hydrological station were 1987 and 2003, respectively. (3) The runoff-sediment relationship curves of different hydrological stations in the Taohe River Basin from 1956 to 2023 showed a power function. (4) The contribution rates of climate change and human activities to runoff reduction in the Taohe River Basin were 42.54% and 57.47%, respectively. The contribution rates of climate change and human activities to sediment discharge reduction in the Taohe River Basin were 8.53% and 91.47%, respectively. [Conclusion] The runoff and sediment discharge in the Taohe River Basin showed significant decreasing trends, with the impact of human activities on them accounting for over 50%. Human activities were the main influencing factors of runoff and sediment reduction in the Taohe River Basin.

Keywords: runoff; sediment discharge; Budyko equation; cumulative slope change rate comparison method; Taohe River Basin

黄河流域作为我国第二大河流,自20世纪80年代以来,一直呈现“水沙均减”的趋势^[1]。作为中国重要的生态屏障和粮食基地,黄河流域逐渐步入高质量发展的积极态势。但随着全球气候变暖和人类活动加剧,水资源短缺、水沙关系不协调、经济发展不平衡以及生态环境脆弱仍旧是黄河流域面临的严重挑战^[2]。因此,及时掌握水沙变化特征,科学认识水沙关系曲线,准确揭示水沙变化机制,对黄河流域系统治理、生态保护和高质量发展具有重要意义。

洮河流域是黄河上游右岸的第二大支流^[3]。流域内水库、引提水、水电站等水利水电开发工程和水平梯田、淤地坝等水土保持措施等人类活动影响频繁,加之地形和气候变化复杂多样,其产汇流机制的显著变化是目前水文领域学者关注的焦点。目前,学者们已经通过SWAT模型、多元统计分析法、相关系数法、弹性分析法等方法,对洮河流域径流变化的归因进行了分析^[4-6]。但由于大多数学者使用了不同的方法导致得到的结果有所差异,且使用多种方法时如何判别模拟效果最佳仍需深入探讨。如马亚丽等^[7]基于SWAT模型分离气候变化和人类活动对洮河流域实测径流变化的贡献率,结果表明气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分别为20%和80%,人类活动是主要因素。而刘酌希等^[8]基于SWAT模型分离的气候变化和人类活动对径流变化的贡献率分别为58.9%和41.1%,气候变化是径流减少的主要原因。可见,即便是对同一个流域,使用同样研究方法,由于时间序列长度不一等因素也会导致研究结果不一致的现象。因此,如何有效阐明洮河流域水沙变化机制仍旧是当下亟需解决的热点问题。

综上,目前对洮河流域水文研究大多集中在径流方面,对于变化环境下输沙量变化原因的相关研究相对较少。同时,尽管关于洮河流域径流变化归因识别的研究相对较多,但由于研究尺度不一、方法不同等原因,目前气候变化和人类活动对洮河流域径流变化

的响应具有不确定性。因此,为了准确掌握洮河流域水沙变化机制,本研究以红旗水文站、李家村水文站和岷县水文站为研究站点,基于1956—2023年的月径流量、月输沙量数据,分析水沙变化趋势,诊断水沙突变年份,建立水沙关系曲线,识别水沙变化的主导性因素。研究结果有助于科学合理地认识洮河流域径流/输沙量的变化特征及其主导机制,对实现黄河流域生态保护与高质量发展具有重要意义。

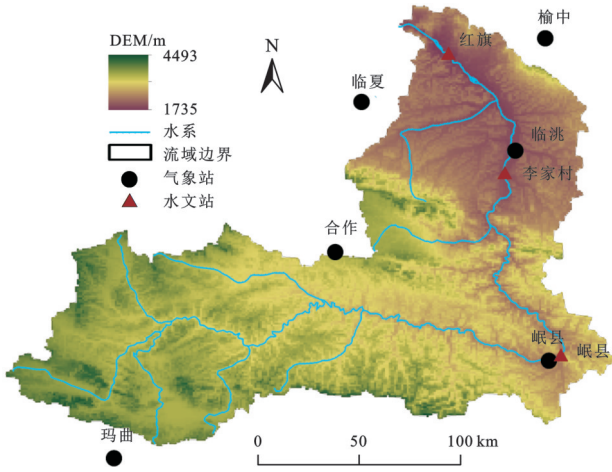
1 材料与方法

1.1 研究区概况

洮河流域位于青藏高原与黄土高原的过渡地带,干流全长673 km²,流域面积为25 527 km²(图1)。洮河流域是黄河上游右岸的第二大支流,地处干旱半干旱气候区,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润。洮河自上游到下游流经三大地貌单元,高原区、高山峡谷区和黄土丘陵区。海拔介于1 735~4 493 m,地貌类型多样,包括高山、高原、丘陵、盆地和河谷等^[4]。红旗水文站、李家村水文站和岷县水文站是洮河流域主要的控制站(表1),流域面积分别为24 973 km²、19 693 km²、14 912 km²。流域的降水量主要集中在汛期,占年总降水量的65%以上^[9]。

1.2 数据来源

1956—2023年月径流、月输沙量数据来源于甘肃省临洮水文水资源勘测中心。综合考虑气象数据序列长度、数据完整性等特性,收集玛曲、岷县、合作、临洮、临夏、榆中等周边气象站同系列长度的日尺度气象数据(<http://data.cma.cn/>),包括降水量、平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、风速和日照时数等,潜在蒸散发量通过彭曼公式计算得到,对于数据缺测、漏测采用线性插补方法补齐。DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),1 km土地利用数据来自于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图未做修改。

图1 研究区位置及水文气象站点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of hydrological and meteorological stations

表1 洮河流域主要控制水文站的基本信息

Table 1 Basic information of main control hydrological stations in Taohe River Basin

水文站	流域面积/ km ²	经度E/ (°)	纬度N/ (°)	时间尺度
红旗	24973	103.57	35.80	1956—2023
李家村	19693	103.82	35.27	1956—2023
岷县	14912	104.07	34.46	1956—2023

1.3 研究方法

1.3.1 水沙变化特征研究方法 采用线性倾向估计法^[10]分析红旗水文站、李家村水文站和岷县水文站年径流、年输沙量变化趋势。基于M-K检验方法^[11]对变化趋势进行显著性检验,并诊断洮河流域径流量、输沙量的突变年份。

1.3.2 水沙关系曲线 建立水沙关系曲线来分析径流量和输沙量的相关性^[12]。假设径流量和输沙量之间的关系曲线可用幂函数表示:

$$Q_s = aQ^b \quad (1)$$

式中: Q_s 为输沙量; Q 为径流量; a 和 b 为拟合系数。

对公式(1)两边取对数:

$$\lg Q_s = \lg a + b \lg Q \quad (2)$$

式中: \lg_s 表示与人类活动关系密切,随时间发生变化, \lg_s 值越高,表明流域内输沙量越大; b 为取对数后的水沙关系曲线斜率, b 值越大,表明流域输沙的能力就越强^[13]。

1.3.3 水沙归因分析 基于年径流量的突变年份,将1956—2023年划分为受人类活动影响时期(1987—2023)和未受人类活动影响的时期(1956—1986)。采用Budyko方程量化洮河流域1956—2023年径流量的变化原因。

本文采用由Choudhury和Yang等基于Budyko假设推导出的流域水热耦合平衡方程^[14-15],结合水量平衡方程得到的表达式如下:

$$P - R = \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{\frac{1}{n}}} \quad (3)$$

式中: n (下垫面特征参数)由 R (径流)、 P (降水量)和 ET_0 (潜在蒸散量)反推得到。

气候和下垫面变化对径流的敏感性系数为:

$$\epsilon_P = \frac{(1 + \varphi^n)^{\frac{1}{n} + 1} - \varphi^{n+1}}{(1 + \varphi^n) \left[(1 + \varphi^n)^{\frac{1}{n}} - \varphi \right]} \quad (4)$$

$$\epsilon_{ET_0} = \frac{1}{(1 + \varphi^n) \left[1 - (1 + \varphi^{-n})^{\frac{1}{n}} \right]} \quad (5)$$

$$\epsilon_n = \frac{\ln(1 + \varphi^n) + \varphi^n \ln(1 + \varphi^{-n})}{n(1 + \varphi^n) \left[1 - (1 + \varphi^{-n})^{\frac{1}{n}} \right]} \quad (6)$$

式中: ϵ_P 、 ϵ_{ET_0} 、 ϵ_n 分别表示径流对降水、潜在蒸发量、下垫面特征参数的敏感性系数; φ 为干旱指数, $\varphi = \frac{ET_0}{P}$ 。

由降水、潜在蒸发量、下垫面特征参数变化引起的径流变化量为:

$$\frac{dR}{R} = \epsilon_P \frac{dP}{P} + \epsilon_{ET_0} \frac{dET_0}{ET_0} + \epsilon_n \frac{dn}{n} \quad (7)$$

式中: $\frac{dR}{R}$ 为径流的变化量; $\frac{dP}{P}$ 为降水的变化量; $\frac{dET_0}{ET_0}$ 为潜在蒸发量的变化量; $\frac{dn}{n}$ 为下垫面特征参数的变化量。

由气候和下垫面变化分别引起的径流变化为:

$$dR_C = dR_P + dR_{ET_0} = \epsilon_P \frac{R}{P} dP + \epsilon_{ET_0} \frac{R}{ET_0} dET_0 \quad (8)$$

$$dR_n = \epsilon_n \frac{R}{n} dn \quad (9)$$

因此,气候和下垫面变化对径流变化的贡献率分别为:

$$\text{Con}_C = dR_C / dR \quad (10)$$

$$\text{Con}_H = dR_H / dR \quad (11)$$

式中: Con_C 为气候变化对径流变化的贡献率。 Con_H 为人类活动对径流变化的贡献率。

基于年输沙量的突变年份,将1956—2023年划分为受人类活动影响时期(2003—2023)和未受人类活动影响的时期(1956—2002)。采用累积斜率变化率比较法量化洮河流域1956—2023年输沙量的变化原因。

累积斜率变化率法,简称SCRCQ法,假设所有影响径流变化驱动因子的贡献率总和为100%,则各驱动因子随时间累积的斜率变化率占输沙量累积斜

率变化率的比值为其对输沙量变化的贡献率^[16]。因此,降水、潜在蒸发量对输沙量变化的贡献率为:

$$\text{Con}_P = \frac{S_P}{S_S} \times 100\% \quad (12)$$

$$\text{Con}_{ET_0} = \frac{S_{ET_0}}{S_S} \times 100\% \quad (13)$$

$$\text{Con}_H = 1 - \text{Con}_P - \text{Con}_{ET_0} \quad (14)$$

式中: Con_P , Con_{ET_0} , Con_H 分别为降水、潜在蒸发、人类活动对输沙量变化的贡献率; S_S , S_P , S_{ET_0} 分别为变异前后累积输沙量、降水、潜在蒸发的斜率变化率。

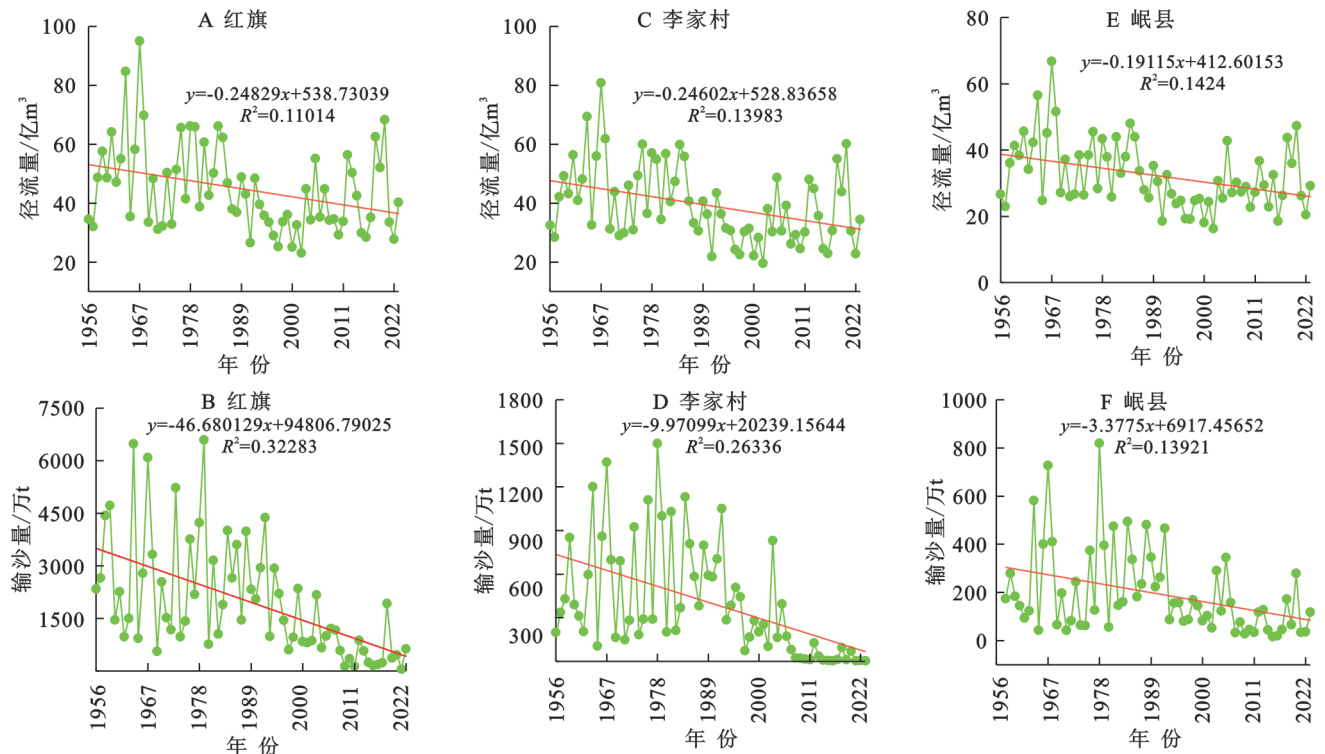


图 2 1956—2023 年洮河流域干流各水文站水沙变化趋势

Fig. 2 Variation trends of runoff and sediment changes at different hydrological stations along main stream of Taohe River Basin (1956—2023)

1956—2023 年经 M-K 检验计算的统计量 U_{Fk} , U_{Bk} 均在置信区间存在交点(图 3), 表明洮河流域各水文站年径流深、年输沙量均发生了突变。红旗水文站、李家村水文站和岷县水文站年径流量的突变时间分别为 1987 年、1986 年和 1981 年。红旗水文站、李家村水文站和岷县水文站年输沙量的突变时间分别为 2003 年、2004 年和 1999 年。

2.2 水沙关系曲线

以年输沙量发生突变的时间为节点, 分别构建 3 个水文站突变点前后的水沙关系曲线。由图 4 可知, 洮河流域各水文站年输沙量和年径流量之间存在显著的幂函数关系。由表 2 可知, 2003 年红旗水文站年输沙量发生突变以后, 系数 a 值减小, 指数 b 值增大。2004 年李家村水文站年输沙量发生突变以后, 系数 a

2 结果与分析

2.1 洮河流域干流水沙变化趋势

1956—2023 年洮河流域的年径流变化幅度较大, 总体呈下降趋势(图 2)。年径流量变化趋势排序为红旗 (-0.248 亿 m^3/a) > 李家村 (-0.246 亿 m^3/a) > 岷县 (-0.191 亿 m^3/a)。年输沙量变化趋势排序为红旗 (-46.68 万 t/a) > 李家村 (-9.97 万 t/a) > 岷县 (-3.38 万 t/a)。经 M-K 检验发现, 1956—2023 年洮河流域各水文站年径流量、年输沙量均呈显著下降趋势。

值、指数 b 值均增大。1999 年岷县水文站年输沙量发生突变以后, 系数 a 值、指数 b 值均减小。

2.3 水沙归因分析

2.3.1 基于 Budyko 方程分解径流变化原因 以年径流突变时间为节点, 将研究时期划分为基准期和变异期。相比较基准期, 变异期的下垫面特征参数变大, 表明人类活动影响增强。同时, 相比较基准期, 变异期径流对降水、潜在蒸发量和下垫面特征参数的敏感性系数均变大, 说明径流发生突变以来, 径流对驱动因素的敏感性增强。

根据 Budyko 流域水热耦合平衡理论, 同时结合表 3 的相关参数, 计算得到洮河流域降水、潜在蒸发量和下垫面特征参数对流域径流变化的贡献率分别为 25.66%, 16.86% 和 57.47%, 即气候变化(降水和潜在

蒸发量)和人类活动(下垫面特征参数)对洮河流域径流深变化的贡献率分别为42.54%和57.47%。总的来

说,1956—2023年人类活动是洮河流域径流减少的主要原因。

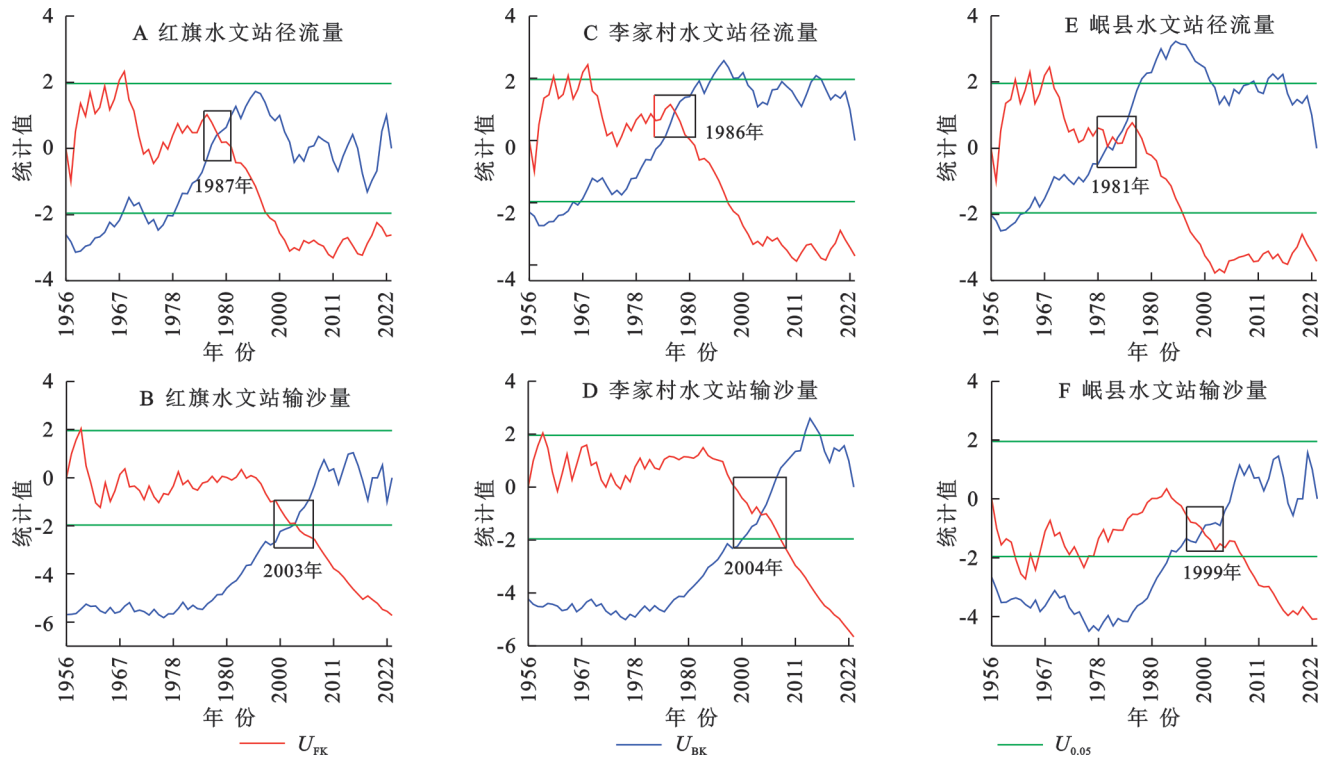


图 3 1956—2023年洮河流域干流水文站水沙突变诊断

Fig. 3 Diagnosis of abrupt changes in runoff and sediment at hydrological stations along main stream of Taohe River Basin (1956—2023)

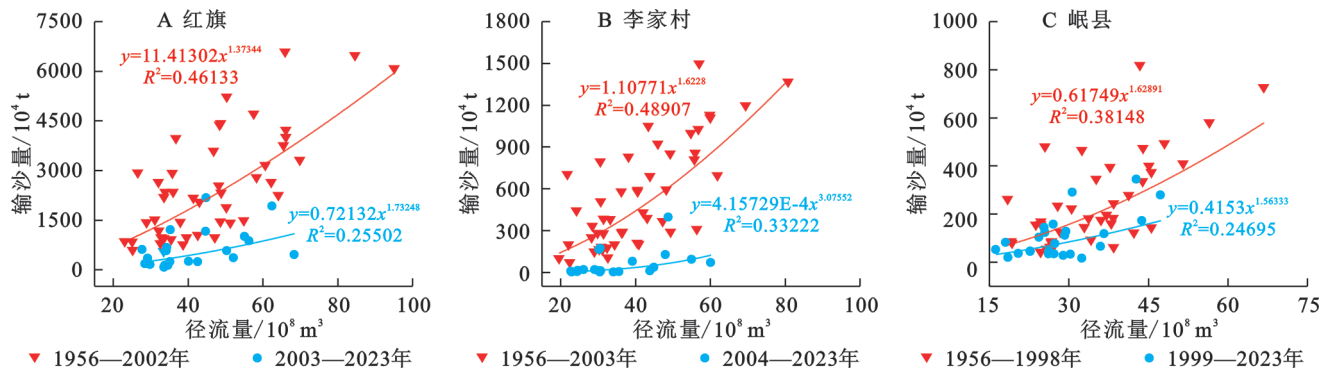


图 4 1956—2023年洮河流域干流水文站突变前后的水沙关系

Fig. 4 Runoff-sediment relationship curves of runoff and sediment before and after abrupt changes of hydrological stations along main stream of Taohe River Basin (1956—2023)

表 2 基于输沙量突变点前后系数 a 和指数 b 的变化

Table 2 Changes in coefficient a and exponent b before and after abrupt change points of sediment discharge

水文站	基准期	研究期	a 前	a 后	变化幅度/%	b 前	b 后	变化幅度/%
红旗	1956—2002	2003—2023	11.41	0.72	-93.69	1.37	1.73	26.28
李家村	1956—2003	2004—2024	1.11	4.16	274.77	1.62	3.08	90.12
岷县	1956—1998	1999—2023	0.62	0.42	-32.26	1.63	1.56	-4.29

2.3.2 基于累积量斜率变化率比较法分解输沙量变化原因 基于年输沙量的突变年份,将研究时期划分为基准期(1956—2002)和变异期(2003—2023)。分别建立不同时期累积输沙量、累积降水和累积潜在蒸

发量与年份的拟合关系式(图 5)。1956—2002年洮河流域累积输沙量、累积降水量和累积潜在蒸发量的斜率分别为 525.47 万 t/a, 436.18 mm/a 和 849.58 mm/a, 2003—2023年洮河流域累积输沙量、累积降水

量和累积潜在蒸发量的斜率分别为 2 640.85 万 t/a, 442.29 mm/a 和 919.53 mm/a。相比较基准期, 变异期累积输沙量、累积降水量和累积潜在蒸发量的斜率分别增加了一 2 115.38 万 t/a, 6.11 mm/a 和 69.95 mm/a。相应地, 累积输沙量、累积降水量和累积潜在蒸发量的斜率变化率分别为 80.10%, 1.40% 和 8.23%。基于公式(12—14), 发现降水、潜在蒸发量和人类活动对输沙量变化的贡献率分别为 -1.75%, 10.28% 和 91.47%。整体来看, 人类活动是洮河流域输沙量变化

的主要影响因素。

表 3 洮河流域水文气象参数特征值
Table 3 Characteristic values of hydrological and meteorological parameters in Taohe River Basin

时期	n	ϵ_p	ϵ_{ET0}	ϵ_n
基准期	0.7799	1.4445	-0.4445	-0.9857
变异期	0.9119	1.5928	-0.5928	-1.2351
总时期	0.8643	1.5184	-0.5184	-1.1118

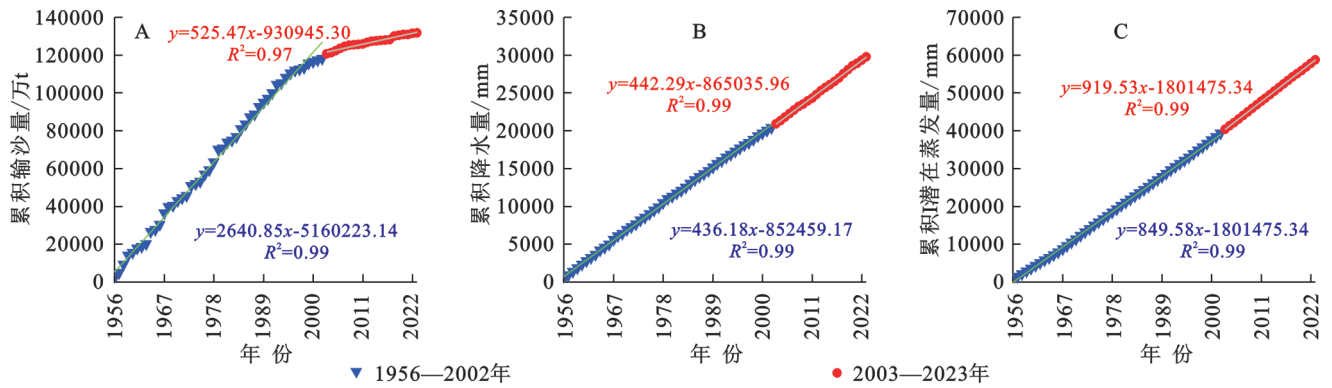


图 5 洮河流域输沙量、降水量和潜在蒸发量累积曲线

Fig. 5 Cumulative curves of sediment discharge, precipitation and potential evaporation in Taohe River Basin

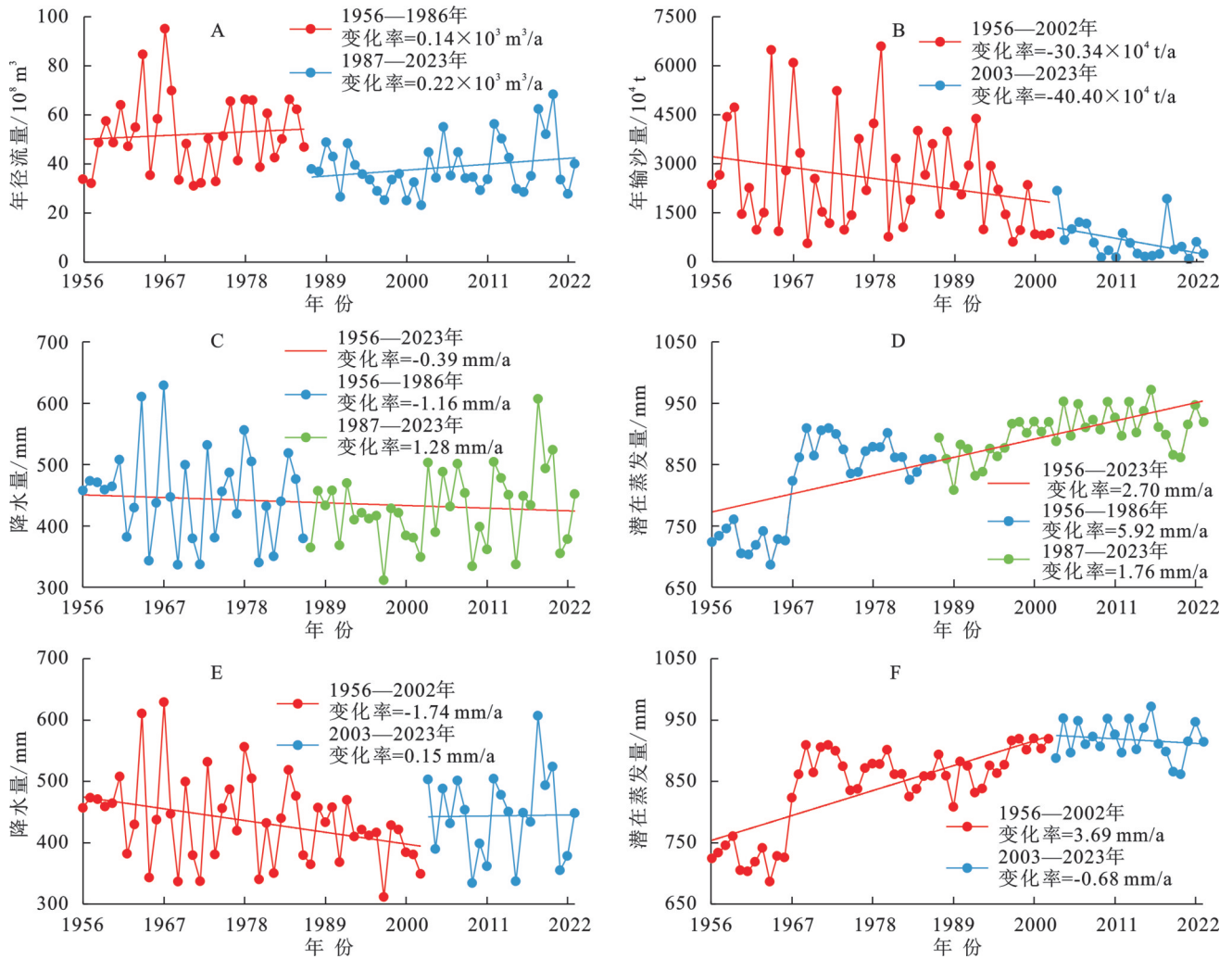
3 讨论

3.1 气候变化对水沙变化的影响

气候变化主要通过影响降水和潜在蒸发量对径流产生影响^[17]。在“暖湿化”现象下, 降水和蒸发增加的综合作用使得洮河流域径流和输沙量呈显著减少趋势。1956—2023年洮河流域年降水量呈下降趋势, 年潜在蒸发量呈上升趋势(图6)。当年径流发生突变前, 年降水量以 1.16 mm/a 的速率下降, 年潜在蒸发量以 5.92 mm/a 的速率上升; 年径流量发生突变后, 年降水量由之前的下降趋势转为上升趋势, 上升速率为 1.28 mm/a, 而潜在蒸发量仍呈上升趋势, 但上升趋势相较于之前的速率减小为 1.76 mm/a。降水“先减后增”、蒸发增加速率减缓, 均表明 20 世纪 90 年代以来, 洮河流域年径流的变化趋势有增长趋势, 这与王逸飞等研究一致^[5]。当年输沙量发生突变前, 年降水量以 1.74 mm/a 的速率下降, 年潜在蒸发量以 3.69 mm/a 的速率上升(图6); 年输沙量发生突变后, 年降水量由之前的下降趋势转为上升趋势, 上升速率为 0.15 mm/a, 而潜在蒸发量由之前的上升趋势转为下降趋势, 下降速率为 0.68 mm/a。降水“先减后增”、蒸发“先增后减”, 均表明年输沙量发生突变以来, 洮河流域的年径流量具有增加趋势, 导致下游河道泥沙输送能力提升。因此, 洮河流域年输沙量呈显著下降趋势。

3.2 人类活动对水沙变化的影响

本研究指出, 人类活动是引起洮河流域径流和输沙量减少的主要因素, 这与以往研究结论一致^[17-18]。土地利用面积的变化可以直观反映人类活动的强度。草地是洮河流域主要的土地利用类型。1980—2020年洮河流域林地、城镇用地、水域、草地扩张, 未利用土地、耕地缩减(表4), 这与武磊等研究一致^[18]。20 世纪 90 年代末, “三北防护林工程”和“天然林保护工程”等大规模造林项目实施, 以及快速的城镇化发展均使得洮河流域的土地利用类型发生了较大的转变。与 1980 年相比, 2020 年, 洮河流域城镇面积变化增加最大, 增加面积为 126 km²。耕地面积减少最多, 减少面积为 282 km²。因此, 土地利用转变对流域下垫面的影响显著。此外, 洮河流域是黄河上游的重要支流, 水利工程修建和水土保持措施实施对流域径流和输沙量均产生了显著影响, 如流域内修建了九甸峡水电站、引洮工程等水利工程。值得注意的是, 九甸峡水电站和引洮工程修建前, 年径流量和年输沙量均呈下降趋势。而九甸峡水电站和引洮工程修建后, 年径流呈上升趋势, 但年输沙量下降趋势变大。表明九甸峡水利枢纽和引洮工程的建设极大地改变了洮河流域下游河道的径流产汇流过程和泥沙输移过程, 对径流和输沙量的影响较大。



注:C、D主要是依据径流量突变时间;而E、F主要是依据输沙量突变时间。

图 6 基于突变年份洮河流域气象要素变化趋势

Fig. 6 Variation trends of meteorological elements based on abrupt change years in Taohe River Basin

表 4 1980—2020 年洮河流域土地利用转移矩阵

Table 4 Land use transfer matrix of Taohe River Basin (1980—2020)

土地利用类型	1980年		2020年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	3454	13.76	3174	12.68
林地	5850	23.31	5953	23.78
草地	14639	58.34	14679	58.64
水域	133	0.53	148	0.59
城镇用地	228	0.91	354	1.41
未利用土地	790	3.15	726	2.90

4 结论

(1) 1956—2023 年洮河流域水沙均呈下降趋势。其中,红旗水文站的水沙变化趋势最大,其次是李家村水文站,最后是岷县水文站,表明洮河流域自上游至下游,水沙锐减趋势增大。

(2) 1956—2023 年洮河流域各水文站年径流、年输沙量均发生了突变。红旗水文站、李家村水文站和岷县水文站年径流量的突变时间分别为 1987 年、1986 年和 1981 年。红旗水文站、李家村水文站和岷县水文站年输沙量的突变时间分别为 2003 年、2004 年和 1999 年。

(3) 洮河流域各水文站年输沙量和年径流量之间存在显著的幂函数关系。且年输沙量发生突变均对水沙关系曲线产生了影响。

(4) 人类活动是洮河流域年径流深、年输沙量变化的主要因素。

参考文献(References):

- [1] 刘晓燕,王鹏,党素珍.黄河水沙变化:历史、现状与未来[J].水利学报,2024,55(10):1135-1145.
Liu X Y, Wang P, Dang S Z. Variations in water and sediment of the Yellow River: historical perspectives, current status, and future outlook[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(10):1135-1145.
- [2] 王浩,赵勇.新时期治黄方略初探[J].水利学报,2019,50(11):1291-1298.

- Wang H, Zhao Y. Preliminary study on harnessing strategies for Yellow River in the new period [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(11):1291-1298.
- [3] 管晓祥,金君良,黄爱明,等. 黄河流域典型流域水气象变化与径流过程模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2019(5):36-43.
- Guan X X, Jin J L, Huang A M, et al. Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(5):36-43.
- [4] 袁腾港,张英,钱继坤,等. 甘肃洮河流域水文气象动态及径流和水质驱动机制[J]. *冰川冻土*, 2024, 46(4):1329-1340.
- Yuan T G, Zhang Y, Qian J K, et al. Hydrometeorological dynamics and driving mechanism of runoff and water quality in the Taohe River basin, Gansu Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024, 46(4):1329-1340.
- [5] 王逸飞,武磊,杨致远,等. 甘肃黄河流域水沙动态及其归因分析[J]. *水资源保护*, 2025, 41(1):131-139.
- Wang Y F, Wu L, Yang Z Y, et al. Runoff and sediment dynamics and attribution analysis in the Yellow River Basin of Gansu Province [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(1):131-139.
- [6] 马亚丽,牛最荣,张芮,等. 洮河流域径流输沙演变与降雨及降雨侵蚀力的关系[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4):90-97, 109.
- Ma Y L, Niu Z R, Zhang R, et al. Relationship between the evolution of runoff and sediment and rainfall and rainfall erosivity in the Taohe River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4):90-97, 109.
- [7] 马亚丽,牛最荣,王兴繁,等. 缺资料地区产流径流时空特性分析及其关系研究:以洮河流域为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(1):58-65.
- Ma Y L, Niu Z R, Wang X F, et al. Spatio-temporal characteristics of water yield and runoff and their relationship in regions with scarce data: a case study of Taohe River Basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(1):58-65.
- [8] 刘酌希,陈鑫,管晓祥,等. 变化环境下洮河流域径流变化归因[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5):87-92, 100.
- Liu Z X, Chen X, Guan X X, et al. Attribution of runoff change in the Taohe River Basin under a changing environment [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5):87-92, 100.
- [9] 李常斌,王帅兵,杨林山,等. 1951—2010年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(5):1259-1266.
- Li C B, Wang S B, Yang L S, et al. Spatial and temporal variation of main hydrologic meteorological elements in the Taohe River Basin from 1951 to 2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5):1259-1266.
- [10] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京:气象出版社, 1999.
- Wei F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999.
- [11] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3):245-259.
- [12] 张曦泽,杨丽虎,宋献方. 黄河上游近60年水沙变化特征及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(2):602-621.
- Zhang X Z, Yang L H, Song X F. Runoff and sediment load changes in the upper Yellow River and their influencing factors in recent 60 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(2):602-621.
- [13] 夏绍钦,张会兰,郝佳欣,等. 长江涪江小河流域水沙关系特性及其驱动因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7):1603-1613.
- Xia S Q, Zhang H L, Hao J X, et al. Characteristics of runoff-sediment rating curves and corresponding driving factors at Xiaoheba Station on Fu River, Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7):1603-1613.
- [14] Choudhury B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 216(1/2):99-110.
- [15] Yang H B, Yang D W, Lei Z D, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(3):W03410.
- [16] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. *地理学报*, 2012, 67(3):388-397.
- Wang S J, Yan Y X, Yan M, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan Drainage Basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3):388-397.
- [17] 胡广录,陶虎,焦娇,等. 黑河中游正义峡径流变化趋势及归因分析[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(9):1414-1424.
- Hu G L, Tao H, Jiao J, et al. Runoff trend and attribution analysis of the Zhengyi Gorge in the middle reaches of the Heihe River [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(9):1414-1424.
- [18] 武磊. 基于流域对比的水沙时空动态及其归因分析 [D]. 兰州:兰州大学, 2023.
- Wu L. Regional soil and water dynamics and its attribution analysis in time and space based on basin comparisons [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.